

Matti-Pekka Nuorva

**SÄHKÖAUTO DYNAAMISENA  
ENERGIAVARASTONA  
SÄHKÖMARKKINOILLA**

Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuussa 2019

## Tiivistelmä

Sähköautoja on yritetty viimeisten vuosien aikana saada yleistymään niin lobbauksen, lainsäädännön kuin markkinoinninkin avulla. Tämä työ on katsaus sähköautojen sähkömarkkinoilla toimimisen kannalta relevanttiin teknologiaan, sekä sähköautojen käyttömahdollisuuksiin eri sähkömarkkinoiden osapuolille, sekä mahdollisiin liiketoimintamalleihin. Lisäksi tämä työ käy läpi tutkimusta sähköautojen toiminnasta sähkömarkkinoilla. Tutkimus viittaisi siihen, että sähköautot ovat potentiaalisesti erittäin hyödyllisiä eri sähkömarkkinoiden osapuolille jo olemassa olevalla infrastruktuurilla.

Sähköautojen voimanlähteen vuoksi ne tulevat väistämättä toimimaan sähkömarkkinoilla. Tämä avaa mahdollisuuksia paitsi sähköauton käyttöön hallittavana kuormana, myös sähköverkkoa tai pientä verkostosaareketta, esimerkiksi kotitaloutta, syöttävänä energiavarastona. Tällaisen toiminnan käyttötarkoituksia olisivat esimerkiksi kuluttajan sähkönsaannin varmistaminen, uusiutuvien energiamuotojen tukeminen ja sähköverkon kuormituksen tasapainottaminen. Lisäksi, mikäli akun purkaminen sähköverkkoon mahdollistuu, olisi sähköautoilla parempi pääsy esimerkiksi tasesähkömarkkinoille, jolloin niitä voitaisiin käyttää tasesähkötoimintaan, tai sähkökauppaan. Tällaista toimintaa varten työssä kehitellään myös auton tietokoneella ajettava sähkökauppa-algoritmi.

# Sisällys

<b>1. JOHDANTO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. EV:N SÄHKÖVARASTOTEKNOLOGIA.....</b>	<b>3</b>
2.1. EV:n Akkuteknologia .....	3
2.2. EV:n Latausteknologia .....	4
<b>3. EV SÄHKÖVERKON KUORMANA .....</b>	<b>6</b>
3.1. Latausasematoiminta .....	6
3.2. EV ladattavana kuormana sähköverkossa .....	8
3.3. EV hallittavana kuormana sähköverkossa .....	8
<b>4. SÄHKÖAUTO ENERGIAVARASTONA.....</b>	<b>10</b>
4.1. Sähköauto sähköverkon tukena .....	10
4.2. Sähköauto kotitalouden tukena.....	11
<b>5. ENERGIAVARASTON SOVELLUKSIA.....</b>	<b>12</b>
5.1. Reservimarkkinat .....	12
5.2. Pakkokäytettävien energiamuotojen integraatio .....	13
<b>6. ENERGIAVARASTOLIIKETOIMINTA .....</b>	<b>13</b>
6.1. Case study: Yksityisauton sähkökauppa-algoritmi.....	13
6.2. Autokaluston energiavarastoliiketominta .....	17
<b>7. YHTEENVETO .....</b>	<b>19</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>20</b>

# 1. JOHDANTO

2010-luvulla on maailmalla, erityisesti länsimaissa, levinnyt huoli ilmastonmuutoksesta. Lobbaus erilaisten kasvihuonekaasujen vähentämiseksi on kuitenkin ollut länsimaissa verrattain tehokasta, ja suuria lisäyksiä kasvihuonekaasupäästöissä ei ole nähty kuin yhdellä alalla: liikenteessä (Seixas 2015). Sähköajoneuvoja (*Electric Vehicle* tai EV) pidetään hyvänä ratkaisuna ilmansaasteiden vähentämiseen, sillä sähköauton liikennekäyttö itsessään ei tuota kasvihuonekaasuja.

Diesel- ja bensiinipolttomootoriauton korvaaminen jollakin toisella voimanlähteellä helpottaisi myös toista länsimaiden ongelmaa: öljyriippuvuutta. Liki jokainen Lähi-idän kriisi 1900- ja 2000-luvuilla on jotenkin liittynyt Yhdysvaltain ja Venäjän yrityksiin turvata öljynsaantinsa alueelta. Öljyn polttaminen energianlähteenä on myös yksi sähkö- ja lämpöteollisuuksien tärkeimmistä, mutta myös saastuttavimmista, tuotantomuodoista. Polttomootorien polttoaineiksi, bensiiniksi ja dieseliksi, jalostettuna öljy on myös liikenteen kasvihuonepäästöjen tärkein aiheuttaja.

Kuluttajalle sähköauto on pitkän aikavälin sijoituksena hyödyllinen: auton propulsiojärjestelmä on pääosin sähköinen, eli liikkuvia osia on erittäin vähän. Tämän takia auton moottori vaatii paljon polttomoottoria vähemmän huoltoa ja varaosia ja siten kestää käyttöä huomattavasti pidempään. Lisäksi sähköauton energiavaraston täydentäminen on halvempaa paitsi sähkön ja öljyjalosteiden erilaisen verotuksen takia, myös koska auton tankista-pyöriin hyötysuhde (tank to wheel efficiency) on varsin hyvä, ja autoa jarruttaessa ajoneuvon kineettistä energiaa voidaan ottaa takaisin talteen jarrutettaessa. Sähköautolla on muitakin etuja, esimerkiksi vähentyvät meluhaitat (Fontainhas et al. 2016)

Jo olemassa olevien EV:iden myynti on omalta osaltaan myös rajoittava tekijä. Tähän vaikuttaa myös se, että vaikka sähköauton käyttökustannukset ovat pitkällä tähtäimellä matalammat, niiden myyntihinnat ovat polttomoottoriautoja korkeammalla. Lisäksi, suurimpia kaupunkeja lukuun ottamatta, latauspisteitä ei vielä ole kovinkaan tiheässä. Tätä ongelmaa pahentaa myös sähköautojen pieni määrä. Auton lataamiseen kuluu myöskin vähintään useita kymmeniä minutteja ja sähköauton toimintasäde on toistaiseksi myöskin vielä varsin pieni, useimmilla

malleilla pisimmillään vain hieman yli sadasta pariin sataan kilometriin (Propfe & Schmid 2011) eli auton käyttömahdollisuudet taajama-alueiden ulkopuolella, ja jopa kahden latauspistettä sisältävän kaupungin välillä ovat sangen rajalliset. Tesla Motors Inc.:in autot tosin ovat tästä poikkeus, ja monet muut autovalmistajat ovat kehittämässä surempiakkuisia malleja. EV:n akku myös kuluu, ja sen varastointikyky heikkenee ajan kanssa. Akku kestää vuosia, mutta sen vaihtaminen on kallista. Suomessa akkukestoisuutta huonontavat myös akkujen alentunut toimintasäde kylmässä ja sekä kuskin että auton toimintakyvyn kannalta tarpeellinen lämmitys.

Lisäksi yleisöllä on kehitystyön nopeuden takia aiheellinen pelko sähköajoneuvoteknologian nopeasta vanhenemisesta, mikä henkilöautojen hintaluokissa voisi johtaa vakavaan vikasijoitukseen. Sähköautojen toimintaa ei myöskään ole alettu tutkimaan kuin vasta viime vuosina. Autoja valmistavilta yrityksiltä tulee myös viemään aikaa kehittää omat sähköautomallinsa, ja rakentaa niiden massatuotantoon vaadittava infrastruktuuri.

## 2. EV:n sähkövarastoteknologia

### 2.1. EV:n Akkuteknologia

EV:itä on olemassa karkeasti ottaen kahta lajia, akkukäyttöisiä sähköajoneuvoja (*Battery Electric Vehicle* tai BEV) ja pistokehybridiajoneuvoja (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle* tai PHEV). Näiden lisäksi olisi olemassa myös perinteiset hybridiajoneuvot (*Hybrid Electric Vehicle* tai HEV), joiden oleellisin ero pistokehybrideihin on, että niiden energiavarastoa ei voi ladata ulkoisesta lähteestä. Koska tämä tarkoittaa, että hybridiajoneuvot eivät voi toimia sähkömarkkinoilla, jätetään ne tässä työssä sähköajoneuvon määritelmän ulkopuolelle. Siispä tässä työssä käytetään sähköajoneuvoista Antti Rautiaisen väitöskirjassaan käyttämää määritelmää: *"a road vehicle which includes an electric power train and an on-board electricity storage which can be charged from an energy source outside the vehicle."* Sähköajoneuvossa on siis sähkömoottori ja energiavarasto, jota voidaan ladata ulkoisesta energialähteestä (Rautiainen 2015).

Akkukäyttöisessä ajoneuvossa on energiavarasto, josta otettua energiaa muutetaan sähkömoottorilla mekaaniseksi energiaksi, joka syötetään ajoneuvon akseliston avulla ajoneuvon vetäviin pyöriin, mikä liikuttaa autoa. Tyypillisesti osa auton hukkaenergiasta otetaan takaisin erilaisten teknologisten ratkaisujen, kuten jarrutusenergian talteenoton avulla, jossa osa auton liike-energiasta muutetaan takaisin sähköksi.

Esiaste sähköajoneuvoihin siirtymisessä on jo pidempään ollut sähköhybridiajoneuvo, jossa on sähkömoottorin lisäksi toinen energianlähde, tyypillisesti polttomoottori. Näitä kahta moottoria käytetään tyypillisesti joko rinnakkain tai toista toisen varavoimanlähteenä. Tyypillisesti ajoneuvossa on akku, johon ohjataan ajoneuvon hukkaenergiaa. Pistokehybrideissä energiavarasto on hukkaenergian keräämisen lisäksi ladattavissa ulkoisesta lähteestä, ja moottori lataa joskus auton akkuja. Sähkömoottoria pyritään käyttämään pääasiallisena voimanlähteenä, kunnes akun varaustaso laskee säädetylle tasolle. Auto pyrkii siis olemaan käyttämättä nestemäistä polttoainetta ja käyttämään sähköenergiaa aina kun mahdollista. PHEV:n pistokkeesta ladattava energiavarasto on suurempi, yleensä ladattavissa ajojen välillä ja

energiatiheydeltään parempi. Tämän takia ajoneuvon sähköajokantama (all-electric range) on huomattavasti pidempi. Tästä tulee nimitys Range-extended tai extended range electric vehicle.

PHEV:issä on tyypillisesti kaksi eri käyttömuotoa: latausta kuluttava (Charge depleting, CD) ja latausta ylläpitävä (Charge Sustaining, CS) muoto. Latausta kuluttavassa muodossa ajoneuvo nojaa yksinomaan tai lähes yksinomaan sähkömoottoriin kun akun varaustaso on tietyn tason yläpuolella, ja pyrkii olemaan käyttämättä nestemäistä polttoainetta. CD muodosta on olemassa sekoittava (blended) variantti, jossa polttomoottoria käytetään tietyissä tilanteissa, mutta niin että sähköistä voimanlähdettä käytetään aina kun mahdollista. Latausta ylläpitävässä muodossa sähköajoneuvo toimii kuten ei-ladattava autonominen hybridi.

Kuluttajaelektroniikan, erityisesti matkapuhelimien ja erilaisten kannettavien tietokoneiden kysynnän kasvu viimeisen kahden vuosikymmenen aikana on johtanut näiden laitteiden nopeaan kehitykseen, ja perusehto tälle kehitykselle on ollut näissä laitteissa käytettynä litiumioniakuteknologian kehittyminen vastaamaan yhä kehittyneempien laitteiden vaatimuksia koon, painon ja suorituskyvyn suhteen. Tämän takia ei ole ihme, että myös liikennöintivälineissä käytetään paljon litiumioniakkuja.

Perinteisessä kotielektroniika-akuissa on kuitenkin joitain ongelmia liikennöintivälineen voimanlähteenä. Vaurioitunut litiumakku on tulipaloriski ja kylmettynyt akku ei varastoi tai vapauta varausta, ja akku kuluu nopeasti, tuottaen tehokkaasti vain joitain satoja purkaus-lataus syklejä. Lisäksi akun kobolttioksidikatodi on myrkyllinen, tahtoo sanoa luontoepäystävällinen. (Vuorilehto 2013) Tämän vuoksi EV:issä usein käytetäänkin muita litiumionien kemiallisia variantteja, joiden energiatiheys on huonompi, mutta jotka ovat paloturvallisempia, luontoystävällisempiä ja kestävätkä pidempään.

## 2.2. EV:n Latausteknologia

Standardi IEC 61851-1 määrittelee neljä eri lataustapaa sähköajoneuvoille:

- Lataustapa 1: Lataaminen tapahtuu 1-3 vaiheisella vaihtovirralla 16 A asti. Latauspiste on oltava suojattu vikavirtakytkimellä. Moodia käytetään pääasiassa kevyiden ajoneuvojen lataamiseen lyhyitä aikoja ja/tai pienillä tehoilla.
- Lataustapa 2: Lataaminen tapahtuu 1-3- vaiheisella vaihtovirralla 32 A asti eli Suomessa noin 22 kW:n teholla. Latauskaapelissa oltava kaapelin

sisäinen hallinta ja suojauslaite, mikä tyypillisesti rajoittaa lataamisen yksivaiheiseen 10 A, mikä suomalaisessa 230 V:n verkossa tarkoittaisi 2.3 kW:n lataustehoa. Latauspisteessä on oltava myös jatkuva maadoitussuojan tarkistus, eikä liittimessä saa olla verkkojännitettä ellei liitin ole oikein kytketty. Käytännössä kaikki sähköautot myydään moodin 2 latauskaapelin kanssa. Moodi on tarkoitettu pääasiassa sähköautojen hitaaseen lataamiseen.

- Lataustapa 3: Lataaminen tapahtuu 1-3 vaiheisella vaihtovirralla 1x70 A tai 3x63 A asti, eli Suomen verkossa noin 43 kW:n teholla. Käytännössä virta kuitenkin rajoittuu yleensä 1-3x32 A, eli n.7-22 kW. Latauspisteessä on oltava myös jatkuva maadoitussuojan tarkistus, eikä pistorasiassa saa kulkea verkkovirta, ellei liitin ole oikein kytketty. Moodi on tarkoitettu sähköautojen peruslataamiseen.
- Lataustapa 4: Lataaminen tapahtuu tasavirralla ja perustuu kommunikaatioon EV:n ja latausaseman välillä. Moodi tarjoaa joustavan ja halittavan lataamisen 120-170 kW:n teoreettisella maksimiteholla. Käytännössä nimellisteho on kuitenkin paljon alhaisempi. Latausjohto on aseman kiinteä osa.

Tällä hetkellä markkinoiden eniten myyty sähköauto on Nissan Leaf (Nissan) jonka akut ovat 24-30kWh (US. department of Energy). Mikäli oletetaan että auton akut ovat tyhjästä lataamisen alkaessa tyhjästä. Suomalaisessa 230V:n verkossa autoa lataisi tyypillisesti 10-13h moodilla 2 , mutta hieman yli tunnista noin neljään tuntiin moodilla 3.



## 3. EV SÄHKÖVERKON KUORMANA

### 3.1. Latausasematoiminta

EV:n akun lataaminen tarkoittaa käytännössä EV:n kytkemistä sähköverkkoon kuormana. Tähän tarvitaan jonkinlainen yhteyspiste EV:n ja sähköverkon välille, jota yleisesti ottaen kutsutaan latausasemaksi. Yksinkertaisimmillaan latausasema on kotitalouspistorasia. Latausaseman rakentaminen ja ylläpito tuottaa erinäisiä kuluja: pääasiassa aseman pääomakulut ja sen toiminnan kiinteät ja muuttuvat kustannukset. Kolme eri tapaa jaotella omistusoikeuden perusteella kenelle nämä kulut lankeavat ovat: (Rautiainen 2015)

- Yksityisomistus: Latausasema on asennettu yksityiselle tontille, ja latauspisteen omistaja maksaa lataamisen kustannukset ja muut liittyvät kulut. Latausasema saattaa tarkoittaa tavallista pistorasiaa (Rautiainen 2015).
- Yhtiöomistus: Asuntoyhtiö omistaa latausaseman ja tarjoaa sen käytön asiakkailleen osana tarjoamaansa palvelua, tai yhtiö omistaa latausaseman ja tarjoaa sen työntekijöittensä käyttöön. Yhtiö maksaa latausaseman kulut ja kerää mahdollisesti latausaseman käyttäjiltä korvauksen sen käytöstä (Rautiainen 2015).
- Julkinen tai kaupallinen omistus: Yhtiö tai siihen verrattavissa oleva taho rakentaa latausasemia ja tarjoaa julkista latauspalvelua joko maksua vastaan tai maksutta (Rautiainen 2015).

Julkinen palvelu voidaan järjestää monin eri tavoin. Yksinkertaisin mekanismi on kiinteän summan laskuttaminen ajoneuvon lataajalta riippumatta varastoidun energian määrästä. Tämä laskutusmalli on erityisen kätevä esimerkiksi maksullisen pysäköinnin yhteydessä tarjottuun lataamiseen, sillä tähän tarvitaan vain latauspiste ja ladatun sähköön hinta on todennäköisesti pieni verrattuna parkkimaksuihin. Asiakasta voidaan myös laskuttaa mitatun energian mukaan, mikä vaatii ylimääräisiä infrastruktuurisijoituksia latausaseman mittausrakenteeseen. Tällaisen hinnoittelumallin kannattavuus on riippuvainen muun muassa siitä, peittääkö energiasta laskutettu hinta mittaamisen kustannukset. (Rautiainen 2015)

Tällä hetkellä asiakkaalla on oikeus valita sähkön myyjä. Sähköauton luonne kuormana, jota voidaan ladata eri paikoissa, kuitenkin hankaloittaa tätä silloin kun Sähköautoa ladataan muualla kuin asiakkaan kotipistorasiasta. Asiakkaan valinnanvapauden säilyttämiseksi, julkisten latauspisteiden käyttöön on esitetty kahta eri mallia:

- Latauspisteen haltija antaa asiakkaan valita myyjän ja/tai tuotteen latauspisteen valikoimasta. Tällöin latauspisteen haltijalla on oltava laaja valikoima sopimuksia useiden eri myyjien kanssa. Tässä vaihtoehdossa olisi myös mahdollista lisätä ladattu energia asiakkaan sähkölaskuun, mikäli asiakas voidaan tunnistaa. (Rautiainen 2015)
- Ladattu energia mitataan auton omalla mittarilla, josta tiedot toimitetaan laskutusta varten asiakkaan valitsemaalle myyjälle. Tällöin asiakas käyttäisi autoaan ladataan aina valitsemaansa energiatuotetta. Tässä mallissa on kuitenkin se ongelma, että asiakkaan ladataan sähköautoaan, ladattu energia näkyy sekä ajoneuvon että latauspisteenhaltijan mittarissa. Olisi siis kehitettävä tapa tunnistaa sähköauton lataaminen, jotta näin ladatusta energiasta ei laskuteta kahteen kertaan, sekä liikennöinti- että kotitalousenergiana. Lisäksi jonkun on maksettava jakeluverkkomaksu. Vastuu tästä todennäköisesti lankeaa latauspisteenhaltijalle, joka kaupallisessa latauksessa laskuttanee sen kuluttajalta. Tätä mallia voidaankin pitää epäkäytännöllisenä, koska sen vaatima infrastruktuuri on monimutkainen ja kallis, ja malli vaatii monimutkaisia järjestelyitä eri välikäsiltä. (Rautiainen 2015)

Nykyisessä sähkömarkkinamallissa kulutustiedot on toimitettava jakeluverkonhaltijalle sähkön myyjien mukaan ryhmiteltynä, eli käytetystä mallista riippumatta jakeluverkonhaltijalla olisi tarvittavat tiedot jakeluverkkomaksun laskuttamiseen sähkön myyjältä.

Lisäksi eri autovalmistajat suosivat autojensa lataamisessa joko vaihto- vai tasavirtaa, mikä vaikuttaa siihen, millaista palvelua latausaseman tulee kyetä antamaan. Lisäksi on kysymys siitä, mihin latausasemat on mielekästä sijoittaa. Autonkäyttäjän, erityisesti täyssähköauton käyttäjän, kannalta kyse on myös siitä, missä autoa on mielekästä käyttää, kun taas Pistokehybridiauton käyttäjän kannalta kyse on lähinnä sähköajon maksimoinnista. Mahdollisuudet lataamiseen kotona, työpaikalla tai kaupallisella latausasemalla ovat näiden kysymysten kannalta olennaisia (Rautiainen 2015).

### **3.2. Sähköauto ladattavana kuormana sähköverkossa**

Yksinkertaisimmillaan sähköverkkoon liitetty sähköauto voidaan nähdä ja mallintaa tavallisena kuormana. Tällöin Sähköauton lataaminen siis alkaa välittömästi, kun auto kytketään latauspisteeseen, ja loppuu kun akku on täynnä tai auto irrotetaan latauspisteestä.

Sähköautojen lisääntymisestä on seurannut luonnollisesti huoli niiden lataamisen käytännön toteutumisesta ja vaikutuksista sähköverkkoon. Antti Rautiaisen väitöskirjassa simuloitiin miljoonan pistokehybridiautonn lataamisesta aiheutuva kulutus suomalaisessa siirtoverkossa, kun autoja ladattiin tavallisena kuormana 3,5 kWn teholla. Lataamisesta aiheutuva lisä havaittiin joiksikin sadoiksi MW:iksi, mikä suhteessa nykyiseen kuormitukseen on melko vaatimaton lisäys. Taajaman jakeluverkossa simuloitiin Sähköautojen vaikutusta kahteen olemassa olevaan verkkoon. Simulaatioissa huomattiin, että merkittävää lisärasitusta verkolle syntyy vasta, kun Sähköautot muodostavat useita kymmeniä prosentteja autokannasta. Lisäksi simuloitiin Pistokehybridien hallitsematonta lataamista maaseutujakeluverkossa ja huomattiin että verkon nykytilan kannalta merkittävä huippukuormituksen lisäys syntyy vasta, kun Pistokehybridien osuus autokannasta on erittäin suuri. Suomalaisen sähköverkon eri osat tulevat siis kestämaan sähköautojen lisääntymistä ja niiden energiantarpeeseen vastaamista hallitsemattomana lataamisena sangen pitkälle ilman että verkkoa tarvitsee uusia (Rautiainen 2015).

### **3.3. EV hallittavana kuormana sähköverkossa**

Sähköauton ollessa hallittu kuorma, sen lataamista voidaan hallita esimerkiksi sen suhteen, milloin lataaminen aloitetaan ja lopetetaan ja millaisella teholla. Tämä on välttämätöntä, mikäli sähköautoa halutaan käyttää kuormansiirtoon (load shifting). Kuormansiirto tarkoittaa sähköverkkoon kiinnitetyn kuorman ajallista siirtämistä otollisempaan hetkeen esim. kuormituksen tai hinnan suhteen. Tämä mahdollistaa tasaisemman sähkönkulutuksen, ja siten sähköverkon kuormituksen (Ratha 2015).

Sähköautot ovat hyvä vaihtoehto kuormansiirtämiselle, sillä ajoneuvojen varsinainen käyttöaika on varsin pieni osa niiden elinajasta. On arvioitu, että pelkästään kotona lataamisen ollessa mahdollista vähintään 24% sähköautoista on kiinni verkkovirrassa mihin vuorokaudenaikaan tahansa siten, että niiden kuormituksen ajankohtaa voidaan siirtää, ja työpaikoilla tapahtuva lataaminen nostaa tämän mahdollisuuden 45%:iin (Babrowski et al. 2014).

Varsinaiset keinot kuorman hallitsemiselle voidaan jakaa kahteen ryhmään, sellaisiin jotka perustuvat paikalliseen informaatioon, ja sellaisiin jotka perustuvat ajoneuvon ja korkeamman tason järjestelmän väliseen kommunikaatioon. Joitain hallintatoimia voidaan perustaa paikalliseen informaatioon, kuten sähköverkon taajuuteen tai jonkinlaiseen ajastukseen. Kommunikaatio voi olla vaikkapa komentoja, kontrolliparametrejä tai ylemmälle taholle (esimerkiksi verkonhaltijalle) ilmoitettavaa valvontaan liittyvää dataa. Kontrolli voidaan järjestää kolmen eri hallinta-arkkitehtuurin kautta (Rautiainen 2015):

- Kommunikaatiossa suoraan auton omistajaan, auto ja ylempi taho kommunikoivat jatkuvasti riippumatta auton sijainnista. Tarvittavan kommunikaatio- ja lataushallintaelektroniikan asentaisi joko auton valmistaja tai kolmas osapuoli. Liiketoiminnan kannalta autoa hallitsevan tahon olisi tehtävä sopimus auton omistajan kanssa. Tällä arkkitehtuurilla auto pystyisi käyttämään useiden eri latausasemia useiden eri jakeluverkonhaltijoiden verkoissa. Tämän arkkitehtuurin käyttö tietyn jakeluverkon alueella vaatisi geologista dataa, mutta sopisi hyvin esimerkiksi sähköverkon tukemiseen maanlaajuisen siirtoverkon alueella (Rautiainen 2015).
- Kommunikaatiossa latausaseman omistajaan, latausasema olisi yhteydessä ylempään tahoon. Käytettävissä olevat toiminnot riippuvat auton latausjärjestelmästä ja latausaseman ominaisuuksista. Tarjottavat latauspalvelut täytyisi sovittaa lataavan asiakkaan tarpeisiin. Latausaseman omistaja voisi esimerkiksi taata lataavan tehon tietylle prosenttivälille maksimitehosta. Liiketoiminnallisesti tämä vaatisi ylemmän tahon ja latausaseman omistajan välisen sopimuksen, ja hallittava resurssi olisi kytketty yhden jakeluverkonhaltijan verkkoon, mikä tekisi latausaseman käyttämisestä jakeluverkon tukemiseen yksinkertaista (Rautiainen 2015).
- Kommunikaatiossa sähkön kuluttajaan kontrollikäsky lähetetään etäluettavaan sähkömittariin tai kiinteistön automaatiojärjestelmään. Liiketoiminnan kannalta tämä vaatii ylemmän tahon ja kiinteistön omistajan välistä sopimusta. Hallittava resurssi on edelleen pysyvä ja kytketty tietyn jakeluverkonhaltijan verkkoon. Lisäksi sähkönmyyntiin liittyvä tukitoiminta olisi yksinkertaista johtuen kiinteistöön jo valmiiksi tehdystä sähkösopimuksesta. Tämä arkkitehtuuri mahdollistaisi useiden eri energiaressurssien käytön, mikä laajentaisi huomattavasti käytössä olevan energian määrää (Rautiainen 2015).

## 4. SÄHKÖAUTO ENERGIAVARASTONA

Autoa käytetään tyypillisesti vain pieni osan vuorokaudesta. Käyttö on erityisen vähäistä virka-aikoina ja öisin, mutta pahimpinaakin ruuhka-aikoina liikenteessä on verrattain pieni osa autoista. (Rautiainen 2015). EV:t, jotka on kytkettävä lataamista varten verkkovirtaan, ja joita normaalissa kaupunkielämässä seisoo paljon aktiivisen ajon ulkopuolella, olisivat hyvä vaihtoehto sähkövarastoksi, jota voidaan tarvittaessa purkaa esimerkiksi yksityiseen sähköjärjestelmään, tai julkiseen sähköverkkoon. Tällaisesta toiminnasta käytetään yleensä lyhenteitä V2H (*vehicle to home*) ja V2G (*vehicle to grid*).

### 4.1. Sähköauto sähköverkon tukena

V2G:tä varten auto tulisi pystyä kytkemään sähköverkkoon sekä kuormana että energianlähteenä, ja siinä tulisi olla mittarilaitteisto ja kommunikaatioyhteys verkonhaltijaan, joka lähettää tukipyynnön käyttöön haluttaville EV:ille (Tomić & Kempton 2007). Lisäksi V2G vaatisi autoon asennetun kaksisuuntaisen konverterin, tai ulkoisen moduulin joka sisältää tarpeellisen suojauslaitteiston. Myös latausaseman johon sähköauto on kytkettynä tulisi kyetä käsittelemään kaksisuuntainen sähkönkulku. Akkua voitaisiin purkaa julkiseen jakeluverkkoon, tai pieneen verkkosaarekkeeseen kuten yksittäiseen kotitalouteen. Mikäli suomessa olisi miljoona sähköautoa (40% nykyisestä autojen määrästä) voidaan aiemmin esitellyn listan perusteella näiden autojen yhteenlasketuksi akkukapasiteetiksi laskea noin 20-30 GWh. Mikäli näistä autoista puolet olisi käytössä, ja autot pystyisivät antamaan verkkoon 5kW per auto, saisi autoista yhteensä syötettyä verkkoon 2,5 GW (Rautiainen 2015).

Johtuen sähköauton roolista (usein) yksityisomistettuna ajoneuvona, on auton omistajan intresseissä, että akun varaus olisi ajon alkaessa sellaisella tasolla että autolla pääsee suunniteltua reittiä. Mikäli sähköautoa käytetään V2Ghen, latauksessa olevan sähköauton akun varaus tuleekin laskemaan. Toisaalta päivittäin yli sähköautonsa yhden latauksen sähköajokantaman ajavan kuluttajan on pakko ladata autonsa päivän ajojen aikana ja/tai niiden välissä. Mikäli lataus tapahtuu pidemmällä tauolla ajojen välissä, esimerkiksi työpäivän aikana, akkua voidaan käyttää energiavarastona. Erilaisilla älykkäillä järjestelmillä on kuitenkin mahdollista rakentaa latausjärjestelmä joka optimoisi lataamisen. Käyttäjä voisi esimerkiksi asettaa auton lataamaan sähköauton akun täyteen tiettyyn aikaan mennessä. Tällöin akkua voitaisiin käyttää pientuotannon osana, kunnes joko älykkäässä sähköverkossa tai autossa oleva tietokone laskee, että verkkoon syöttäminen on lopetettava jotta lataustavoite voidaan saavuttaa (Rautiainen 2015).

V2G:n käyttö kuitenkin tarkoittaa auton akulle lisää lataus-purkaussyklejä, mikä johtaa akun elinajan nopeampaan kulumiseen jonkun muun kuin ajoneuvon omistajan käytössä. Tutkimuksissa on kuitenkin huomattu, että V2G aiheuttaa vain alle puolet akkukapasiteetin vähenemisestä pistokehybridissä per normalisoitu watti- tai ampeeritunti verrattuna ajamiseen (Peterson et al. 2010).

Tällä hetkellä V2G on pienillä tehoilla käyttökelpoinen. Energiavaraston purkaminen verkkoon vastaa ensisijaisesti paikalliseen energiantarpeeseen, ja siirtyy laajempaan verkkoon vasta, jos paikallinen kysyntä ylittyy. Laajassa mittakaavassa tällaisesta toiminnasta saattaa seurata ongelmia, sillä sähköverkko on rakennettu yksisuuntaista sähkönkulkua varten, mutta vuoden 2013 sähkömarkkinalain tiukentuneet vaatimukset verkonhaltijalle tarkoittavat sitä, että Suomessa joudutaan tällä hetkellä tekemään runsaasti verkkoinvestointeja. Näiden verkkoinvestointien yhteydessä olisi mahdollista pienellä lisäinvestoinnilla tehdä verkkoon vaadittavaa kykyä käsitellä kaksisuuntaista sähkönkulkua.

## 4.2. Sähköauto kotitalouden tukena

Pienen verkkosaarekkeen, esimerkiksi yksittäisen kotitalouden energiantarvetta voitaisiin lievittää käyttämällä sähkökatkojen aikana varavoimanlähteenä täyssähköauton akkua tai pistokehybridin polttomoottorigeneraattoria tuottamaan sähköä nestemäisestä polttoaineesta. Auton akku ei kuitenkaan kykenisi pitämään talon lämmitystä tai boilerin toimintaa yllä kovin pitkään, eli nämä kuormat tulisi kytkeä pois päältä. Tällöin sähköajoneuvon tarvitsisi pyörittä lähinnä asunnon valaistusta, kylmälaitteita, sekä mahdollisesti verkkovirtaan kytkettyä kodinelektroniikkaa. (Rautiainen 2015)

Wattenfall OY:n tilastojen mukaan ei-sähkölämmitetyn omakotitalon (120 m<sup>2</sup>, neljä hlö) keskimääräinen kulutus vuodessa on noin 7300 kWh, eli keskimääräinen syöttöteho on hieman 1,15kW (Wattenfall). Koska mukana ei ole ulkolämpötilasta riippuvaisia kuormia, voidaan nämä kulutukset olettaa suurinpiirtein vakioksi vuoden aikana. Tällaista kulutusta 20 kWh akku kestäisi hieman alle 17,5 h, eli taajama-alueella hyvin yli sähkömarkkinalaissa sallitun 6h rajan (finlex).

Tällainen järjestelmä vaatisi kytkimen jolla verkkosaareke voidaan eristää jakeluverkosta jotta sähköauton ei tarvitse syöttää muita verkon asiakkaita. Riippuen asiakkaan suosituksista ja talouden piirisuunnittelusta, myös kolmivaiheinen verkkoyhteys ajoneuvoon saattaa olla tarpeen, tai syötettävät kuormat täytyisi kytkeä tiettyyn vaiheeseen. Mikäli oletetaan ajoneuvo verkon ainoaksi voimanlähteeksi erotuksen aikana, varusteisiin on myös sisällytettävä samankaltaiset tarpeelliset turva- ja hallintajärjestelmät ja -ominaisuudet kuin tavalliseen verkkoon (Rautiainen 2015).

## 5. ENERGIAVARASTON SOVELLUKSIA

Verkkoa tukevana energiavarastona sähköautoa voitaisiin käyttää verkon luotettavuuden ylläpitoon, tasesähkötoimintaan, tai tukemaan sähköenergian siirtoa myyjältä ostajalle. Ennen sähkömarkkinoiden uudistumista tästä syntyvät kulut piilotettiin muuhun hinnoitteluun, mutta sähkömarkkinoiden avauduttua, näille palveluille on syntynyt erilliset markkinansa (Tomić & Kempton 2007).

### 5.1. Reservimarkkinat

Suomessa Kantaverkkoyhtiö Fingrid on vastuussa taajuusohjatun käyttöreservin, taajuusohjatun häiriöreservin ja automaattisen taajuudenhallintareservin ylläpidosta, ja kaikkia kolmea reservimuotoa hankitaan sekä tunti- että vuosimarkkinoilla (Fingrid). Mikäli tarjoukset voidaan jättää automaattisesti, nämä kaikki olisivat sähköautoille sopivia markkinamalleja.

Osallistuakseen reservimarkkinoille, tulee reservinmyyjän olla säätökykyisen kohteen omistaja tai osa toimitusketjua tuottajalta kohteelle, eli sähkönmyyjä tai tasevastaava. Taajuusohjatussa häiriöreservissä reservinmyyjänä voi olla myös avoimen toimitusketjun ulkopuolinen osapuoli. Mikäli reservinmyyjä ei ole kohteen omistaja, on tällä oltava omistajan lupa toimintaansa. Lisäksi myyjän tulee tehdä Fingridin kanssa sopimus reservimarkkinoille osallistumisesta. Reservikohteen tulee täyttää myytävän reservituotteen tekniset- ja markkinapaikan vaatimukset, tai niiden on oltava aggregoitavissa siten, että kohteet kokonaisuutena täyttävät nämä vaatimukset. Aggregointi on sallittua vain saman tasevastaavan saman taseen kohteilla. Taajuusohjatussa häiriöreservissä aggregointi useista eri lähteistä on sallittua. Automaattisten reservien säätöominaisuuksien tulee olla todennettu säätökokein. Lisäksi kohteiden tulee sijaita Suomessa tai olla kytkettävissä suoraan Suomen sähköverkkoon. (Fingrid)

Fingridin mukaan tuntikaupan tarjoukset olisi jätettävä edellisen vuorokauden klo 18.30 mennessä (Fingrid) jolloin sähköauto olisi erityisen sopiva reservinmyyntiin seuraavan vuorokauden aamuyön tunneille. Tarjouksen voisi muotoilla ja jättää esimerkiksi sähköauton tietokone automaattisesti, etukäteen asetettujen asetusten mukaan.

Vuosimarkkinoilla Fingrid valitsee kerran vuodessa reservintoimittajat tarjouskilpailun perusteella. Vain valitut reservintoimittajat toimittavat reserviä vuosisopimuksella, ja heille maksetaan kiinteä hinta toimitetusta reservistä kalleimman hyväksytyn tarjouksen mukaan. Reservisuunnitelmien mukaiset määrät reserviä ostetaan täysimääräisesti, ja toimittajalla on

velvollisuus ylläpitää myymäänsä reserviä vapaan kapasiteettinsa puitteissa. Reservisuunnitelmat tulee toimittaa edellisenä päivänä klo 18 mennessä (Fingrid).

Eri reservilajien tehon vähimmäisvaatimukset vaihtelevat, mutta ovat säännönmukaisesti yksittäisen sähköauton kapasiteetin tavoittamattomissa. Tarvitaan siis useita sähköautoja jotka toimivat saman tasevastaavan alaisuudessa. Lisää tästä luvussa 6.2.

## **5.2. Uusiutuvien energiamuotojen integraatio**

EViden lisäksi vihreä liike on johtanut myös uusiutuvien ja päästöttömien energiamuotojen lisääntymiseen. Vesivoima on vanhastaan paljon käytetty energiamuoto, mutta sen rinnalle on nousemassa aurinko- ja tuulivoima. Kaikissa näissä energiamuodoissa ongelmana on epätasainen, luonnonilmiöistä, erityisesti säästä, riippuva tuotanto.

Koska lähes kaikki uusiutuvat energiamuodot ovat riippuvaisia säästä, ne ovat ns. pakkokäytettäviä energiamuotoja, sillä johtuen niiden tuotantomuodoista, tuotannon säätely on taloudellisesti verrattavissa polttoaineen poisheittämiseen. Mikäli pakkokäytettävien energiamuotojen kapasiteetti ylittää kysynnän, ylijäämä tulee varastoida tai jättää tuottamatta. Tuulivoiman kohdalla tämä tulee todennäköisesti tapahtumaan yöaikaan, kun energiankulutus on vähäisintä (Bellekom et al. 2012). Aurinkovoiman tuotantohuippu puolestaan on keskipäivän aikaan. (Kempton & Tomić 2005b).

Kuten aiemmin luvussa 4.2. todettiin, sähköautoista huomattava osa olisi käytettävissä kuormansiirtoon. sähköautojen lisääntyessä tämä tarkoittaisi kasvavaa yksityisomistettua energiavarastoa jonka energiantarve voitaisiin pyrkiä tyydyttämään matalan kulutuksen ja tuulivoiman tuotannon huippujen aikana kuormansiirrolla. Esimerkiksi Hollanti saisi tällä tavalla toteutettua maan tavoitteen 10GW:stä asennettua tuulivoimaa, ja miljoona sähköautoa hollantilaisilla teillä (Bellekom et al. 2012). Toisaalta V2G:n laskettiin yölataamisen lisänä tehostavan tanskalaisen sähköverkon toimintaa merkittävästi konservatiivisista käyttöarvioista huolimatta (Lund et al. 2008).

# **6. ENERGIAVARASTOLIIKETOIMINTA**

## **6.1. Case study: Yksityisauton sähkökauppa-algoritmi**

Mikäli V2G joskus yleistyy, olisivat sähköautojen omistajat hyvässä asemassa käydä pienimuotoista sähkökauppaa tapana peittää osan polttoainekuluistaan, ja sopivissa



olosuhteissa jopa tekemään voittoa. Auton omistajan ei kuitenkaan voida olettaa tekevän manuaalisesti osto- tai myyntipäätöstä joka tunti, varsinkaan yöaikaan, joten todennäköisin pääasiallinen kaupankäyntikeino olisi auton tietokoneen ajama algoritmi. Liite 1 on MatLabille kirjoitettu versio siitä, millainen tämä algoritmi voisi olla.

Algoritmissä esiintyvät muuttujat ovat:

- E: Energiantarve.
- P: Latausteho.
- n: hyötysuhde.
- Cn<sub>lh</sub>: Siirtohintaa ladattaessa.
- Cn<sub>ph</sub>: Siirtohintaa purettaessa.
- C<sub>eh</sub>: Sähkön markkinahinta kuluvana tuntina.

Algoritmi määrittelee ensin ylläolevat auton tekniset ominaisuudet, sekä sähkön hinnat latauksen aikana yksiulotteisina matriiseina. Teknisten ominaisuuksien perusteella lasketaan akun täyttämiseen vaadittavat kokonaiset tunnit, ja näistä yli jäävä tunnin osa. Tämän jälkeen vähennetään lataamiseen käytettävät alkavat tunnit lataukseen käytettävissä olevasta ajasta, jotta saadaan selville riittääkö aika akun lataamiseen täyteen asti. Mikäli ei, ei varastoliiketoiminta ole mielekästä, vaan ohjelman suoritus lopetetaan. Erotus on varastoliiketoimintaan käytettävissä oleva aika. Mikäli purkutehoa rajoitetaan siten, että tunnin purkaminen saadaan korvattua tunnin lataamisella, saadaan myyntikäyttöön käytettävissä olevien tuntiparien määrä jakamalla tämä ylimääräinen aika kahdella, ja pyöristämällä alaspäin.

Muodostetaan eri tuntien sähkön osto- ja myyntihinnat summaamalla tuntikohtaiset spot-hinnat spot-hinnat siirtohintoihin ladattaessa, ja vähentämällä niistä siirtohinnat purettaessa. Erotetaan ostohinnoista  $t$  pienintä, joissa  $t$  on auton lataamiseen kuluva täysien tuntien määrä. Vertaillaan  $i$  suurinta myyntihintaa kerrottuna hyötysuhteen neliöllä  $i$  pienimpään jäljellä olevaan ostohintaan, jossa  $i$  on varastoliiketoimintaan käytettävissä olevien tuntiparien määrä. Mikäli myyntihinta on suurempi kuin ostohinta, kannattaa noina tunteina myydä ja ostaa. Myyntihinta kerrotaan hyötysuhteen neliöllä, koska purkuteho mitoitetaan siten, että se saadaan korvattua tunnin lataamisella. Purkuteho on siis lataustehon ja hyötysuhteen tulo. Epäideaalisella laitteistolla verkkoon syötetystä purkutehosta päättyy verkkoon vain purkutehon ja hyötysuhteen tulo, eli lataustehon, ja hyötysuhteen neliön tulo, ja vain toimitetusta sähköstä maksetaan.

Kun ostettavat tunnit on ratkaistu, muodostetaan ostojen yhteishinta laskemalla ostohinnat yhteen, ja kertomalla saatu luku latausteholla. Mikäli myyntiä tapahtuu, summataan myös myyntien tuntihinnat, ja kerrotaan ne tehon ja tehokertoimen neliön tulolla. Lopuksi

liiketoiminnan ja latauksen tulos saadaan vähentämällä myyntien yhteishinnasta ostojen yhteishinta. Negatiivinen luku siis merkitsee käyttäjän liike tappiota.

Jotta algoritmin toimivuus saadaan selville, simuloidaan sähköauton lataamista klo 19-07, seitsemän yön ajan, ja verrataan saatuja tuloksia sen toimintaa Sähköauton lataamiseen hallitsemattomana ja hallittuna lataamisena samalla aikavälillä ja samoilla hinnoilla. Koska sähköauton lataaminen tapahtuu todennäköisimmin kotitalouspistorasiasta moodilla 2, latausvirraksi voidaan olettaa yksivaiheinen 10 A vaihtovirta, jolloin teho olisi Suomen jakeluverkossa 2.3 kVA. Näillä virroilla akun häviöt purettaessa ja ladattaessa on mitattu 6.4% eli hyötysuhteet ovat 93.6%. (Apostolaki-Iosifidou, E. et al. 2017). Lisäksi oletetaan purkutehoksi lataustehon ja hyötysuhteen tulo, jotta purkaminen on korvattavissa samankestoisella lataamisella.

klo	24.joulu	23.joulu	22.joulu	21.joulu	20.joulu	19.joulu	18.joulu	17.joulu
00 - 01	16,69	26,33	27,10	27,57	29,18	30,44	28,22	28,90
01 - 02	16,65	22,47	26,45	27,08	28,53	29,43	27,90	28,20
02 - 03	16,64	18,72	26,20	26,98	28,08	29,35	27,55	28,20
03 - 04	16,66	11,95	26,36	26,95	28,11	29,68	27,39	27,94
04 - 05	16,70	12,40	26,92	27,37	28,87	31,57	28,04	28,21
05 - 06	18,86	8,81	27,54	28,00	29,72	35,83	29,94	28,38
06 - 07	19,61	14,94	31,90	30,86	30,78	46,08	41,43	28,58
07 - 08	24,87	13,39	37,45	38,83	33,80	66,53	47,33	29,40
08 - 09	26,06	20,28	39,07	31,73	36,02	75,06	52,22	30,23
09 - 10	26,71	18,79	41,79	30,57	34,96	75,21	51,25	30,97
10 - 11	27,01	20,08	30,63	30,10	32,34	56,79	37,76	31,22
11 - 12	26,97	17,92	34,01	30,20	32,60	60,50	36,19	31,53
12 - 13	26,70	14,77	38,52	30,14	32,92	56,78	45,85	31,44
13 - 14	26,70	13,32	35,38	30,11	32,91	56,70	41,39	31,40
14 - 15	26,66	16,79	38,54	30,39	38,51	56,79	50,08	31,55
15 - 16	26,93	21,56	41,33	30,69	39,12	63,73	63,93	32,24
16 - 17	27,18	25,22	41,04	30,79	38,83	66,56	71,74	33,18
17 - 18	26,94	24,96	38,58	30,75	38,82	67,89	77,17	33,21
18 - 19	26,31	23,21	37,49	30,58	36,63	39,20	66,62	32,10
19 - 20	25,95	21,18	29,81	30,06	31,64	32,35	42,10	31,24
20 - 21	25,96	18,28	29,06	29,55	30,82	31,35	33,56	30,53
21 - 22	26,36	14,11	28,86	29,17	30,05	30,68	32,94	30,24
22 - 23	26,17	11,11	27,87	28,06	29,04	29,82	31,33	29,68
23 - 00	25,99	4,12	26,97	27,32	28,00	29,10	30,38	28,59

Taulukko 1: Spot-hinnat simuloituna aikavälinä €/MWh. Latausajan ulkopuolelle jääneet hinnat ovat punaisella.

Sähkön hintoina käytetään sähkön Nordpoolin tuntikohtaisia day-ahead spot-hintoja hintoja Suomessa 17.12-24.12.2017 (Nordpoolspot.com). Verkkohintoina käytetään Elenia OY:n aikasähkösopimushintoja, jotka ovat 6.11 snt/kWh klo 07-22 ja 4.82 snt/kWh klo 22-07. Purkumaksuja ei peritä, koska ”tuotantolaitoksen” syöttö on alle 50kVA. (Elenia OY) Sähköntarpeeksi oletetaan 10kWh per yö. Tällöin pelkkään auton lataamiseen kuluu 4.645h yössä.

Algoritmin nettotulokseksi saatiin viikolta 5,373 €, mikä on täsmälleen sama summa kuin hallitulla lataamisella. Algoritmin toiminnan läheisempi tarkastelu osoitti tämän johtuvan siitä, että sähköä ei myyty, vaan ainoastaan ostettiin halvimpiin hintoihin, eli algoritmi vain latasi hallitusti. Syynä tähän on, että sähkön hinnan muodostuminen ostettaessa markkinahinnasta ja siirtohinnoista. Myytäessä voitoksi jää toimitetun sähkön hinnan ja purkuhinnan erotus. Myytäessä vain toimitetusta sähköstä maksetaan, joten laitteiston hävikki alentaa myynituottoja edelleen, ja lisäksi algoritmista on madallettu purkutehoa siten, että akusta poistuva sähkö ennen purkuhävikkiä on saman suuruinen kuin akkuun latautuva sähkö lataushävikin jälkeen. Akkuun ostettua kilovattituntia kohden saadaan siis myytyä vain 0,876 kWh Sähkön markkinahinta vaihteli, mutta ei koskaan ylittänyt sähkön siirtohintaa, joten annetuilla hinnoilla myynti ei koskaan kannattanut, eikä sitä siis tehty.

Hallitsematon lataaminen pelkästään yöaikaan maksoi 5,532 € ja välittömästi alkava hallitsematon lataaminen 6,337 €. Hallittava lataaminen on siis selkeästi kannattavin vaihtoehto, mutta sähkön myynti ei ole kannattavaa nykyisellä markkinamallilla

Yksityisasiakaan sähkövarastoliiketoiminnan kannalta olisi siis parempi jokin toinen liiketoimintamalli, jolla siirtomaksuja ei perittäisi ja/tai sähkön hinta olisi huomattavasti vaihtelevampi. Tämän havainnollistamiseksi simuloidaan algoritmilla yhden yön lataaminen osto- ja myyntitoimintana, ja hallitsemattomana lataamisena siten, että auton tekniset ominaisuudet ovat samat, ja lataamiseen on käytettävissä sama kellonaikaväli, mutta tuntihinnat kasvavat 0,6:n inkrementteissä 0,6:sta snt/kWh 7,2:een snt/kWh, siirtohinnat ladattaessa ovat 1snt/kWh, ja purkuhintoja ei peritä.

Hinnat	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	6,6	7,2
--------	-----	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----	-----	---	-----	-----

Taulukko 2: Sähkön hinnat.

Näillä arvoilla algoritmin nettotulos oli -23,45 snt, ja hallitun lataamisen -28,94 snt tappiollinen. Tämä johtuu auton suuresta sähköntarpeesta simuloidussa tilanteessa, ja myydyn sähkön kattamiseksi ostettavista lisätunneista. Algoritmin pääasiallinen käyttötarkoitus on auton akun lataamisen kattaminen sähkön kulutusta (ajamista) varten, ei voitollisen sähkökauppaliiketoiminnan harjoittaminen. Tällainen liiketoiminta vaatisi erilaista

varastonhallintaa, ja saattaisi johtaa auton ajokyvyn huononemiseen, kun varastoitu sähkön määrä on erityisen alhainen.

Purkuhintojen mahdollisen vaikutuksen havainnoimiseksi suoritetaan simulaatio toisen kerran siten, että purkuhinnat ovat 1 snt/kWh. Algoritmin tulos oli -26,72 snt, ja sähköä myytiin kahden tunnin edestä. Sähköautolla on siis mahdollista käydä verrattain menestyksellistä liiketoimintaa, varsinkin mikäli auto on vähällä ajolla, mutta paljon kiinni latauspisteessä silloinkin, kun algoritmi priorisoi akun täyteen lataamista.

## 6.2. Autokaluston energiavarastoliiketoiminta

Erityisen houkutteleva V2G:hen perustuva liiketoiminta olisi laajan sähköajoneuvokaluston omaaville kuljetusalan yrityksille, joiden hyvin organisoitu, ja näin ollen ennustettavissa oleva ajoaikataulu tekisi näistä luotettavia energiantoimittajia, joilla on käytössään huomattavasti yksittäistä henkilöautoa laajempi kapasiteetti. Lisäksi autonsa verkkotoiminnan palvelukseen antavat kuluttajat, mukaan lukien edellä mainitut yritykset voisivat pyrkiä hankkimaan lisätienestejä antamalla EV:nsä energiavaraston esimerkiksi säätösähkömarkkinoille. Erityisen kätevää tämä olisi tilanteessa, jossa yrityksellä on varikko jossa sen EV:t ovat käytön ulkopuolella verkkoon kytkettynä, mikäli varikon älylatausarkkitehtuuri on suoraan yhteydessä sähkön kuluttajaan, eli tässä tapauksessa varikon automaatiojärjestelmään, joka ottaa EV:itä V2G-käyttöön halutun kapasiteetin ja autojen tulemisten ja menemisten mukaan. (Tomić & Kempton 2007).

Suomalaisilla reservimarkkinoilla reservikohteille esitetyt vaatimukset ovat huomattavasti yksittäisen sähköauton kapasiteettia korkeammat. Tämän vuoksi sähköauton käyttö reservitoimintaan vaatisi yksittäisen reservinmyyjän, joilla on autonomistajien lupa autojensa käyttämiseen. Reservinmyyjän toiminta olisi todennäköisesti välityspalvelua, jossa reservinmyyjä varmistaisi riittävän määrän sähköautoja olevan käytettävissä toimintaan sovittuna aikana, ja hoitaisi vuosi- ja tuntimarkkinoilla toimimisen. Todennäköisin toimija tällaisella markkinalla olisi olemassaoleva sähkön myyntiyhtiö, joka käyttäisi asiakkaittensa verkostosaarekkeeseen kytkettyä kapasiteettia esimerkiksi kuormansiirtona. Esimerkki tästä on Fortum Oyj:n virtuaalivoimala, jossa yhtiö ohjaa asiakkaittensa lämminvesivaraajien toimintaa kauko-ohjauksella reservitarpeen mukaisesti (Fortum). Koska sähköauton toimiminen reservikohteena vaatisi sen kytkemistä sähköverkkoon, on auton reservitoiminta auton omistajan elämässä huomattavampaa. Näinollen on mahdollista, että auton omistajat luopuvat olemassaolevan sähköyhtiön kaltaisesta voittoa tavoittelevasta välikädestä, ja perustavat oman reservitoimintayhtiönsä. Todennäköisin yhtiömuoto tällaiselle yhtiölle olisi osuuskunta.

Polttomoottoriautojen huolto ja tankkaus tarkoittavat sitä, että polttomoottoriautokalustolla on lisääntyviä kuluja. V2G-kalusto puolestaan tarkoittaa potentiaalisesti kerääntyviä tuloja. Ehdotetussa mallissa 18 PHEV:tä jotka jokainen kykenisivät antamaan 60kW verkkoon per auto, kykenisivät antamaan samanaikaisella purkamisella yhteensä 1080kW (Hill et al. 2012). Tämä ei kuitenkaan riitä Suomalaisilla markkinoilla, jossa kantaverkkoyhtiö Fingrid vaatii säätösähkötarjouksen tekijältä kykyä toteuttaa 10MW tehonmuutos 15 minuutissa (Fingrid). Tämä vaatisi edellä mainitulla mallilla 167 auton kaluston.

## 7. YHTEENVETO

Tämä työ on katsaus sähköautojen käyttöön energiavarastona sähkömarkkinoilla ja siitä tehtyyn tutkimukseen. Työssä käsiteltiin sähköauton akku- ja latausteknologia, lataustapoja, sekä käyttötarkoituksia sähkömarkkinoilla toimivana energiavarastona, sekä laadittiin algoritmi yksityisauton tietokoneen käymälle automatisoidulle sähkökaupalle.

Löydetyn tutkimuksen perusteella sähkökauppa itsessään ei ole sähköautojen yleistymisen este, vaan erilaiset autojen ja infrastruktuurin tekniset rajoitteet, kuten rajoittunut akkukapasiteetti ja tästä johtuva tiheä lataustarve, sekä sen tyydyttämiseen vaadittavan latausinfrastruktuurin puutteellisuus. Tällä hetkellä sähköautojen yleisin latauspiste on kotitalouspistorasia, johon auton omistajalla on jonkinlainen käyttöoikeus. Tällaisia latauspisteitä ovat paitsi kotitalouspistorasiat, myös kiinteistöihin kuuluvat lämmitystolpat. Nämä tulokset viittaavat sähköautojen soveltuvan parhaiten pienille välimatkoille, tyypillisesti kaupunkiajoon.

Sähköautojen käyttäminen pienten välimatkojen ajamiseen tarkoittaa sitä, että niiden ajoaika auton koko elinkaaresta on rajallinen, ja auton akun lataustarve on harvoin akuutti. Olemassa olevan infrastruktuurin piirissä tämä tekee sähköajoneuvoista ihanteellisia tiettyihin sähköverkon tukipalveluihin. Näiden tukipalveluiden käytössä intressejä on hieman kaikilla markkinoiden osapuolilla. Erityisesti kuormansiirto on kaikkia markkinoiden osapuolia hyödyttävä palvelu. Sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottaminen helpottuu, sähkönkulutus, ja sen aiheuttama verkon rasitus vähenee, ja verkkomaksut pienentyvät. Lisäksi uusiutuvia, ja muita vaikeasti hallittavia energiamuotoja voidaan lisätä enemmän, ennen kuin olemassa olevaa sähköverkkoa tarvitsee parantaa.

Myös sähköajoneuvon käyttäminen sähköön syöttämiseksi sähköverkkoon sisältää potentiaalisia hyötyjä. Tärkeimpänä hyötynä auton omistajalle olisi osallistuminen tasesähkömarkkinoille ja erityisesti reservimarkkinoille, joilla maksetaan pelkästään valmiinaolosta. Toinen mahdollinen toimintamalli autonomistajalle olisi sähkövarastolla käytävä sähkökauppa. Erityisen hyödyllistä V2G:hen perustuva liiketoiminta olisi suuria autokalustoja omistaville tahoille. Kaiken kaikkiaan sähköautojen potentiaali sähkömarkkinoille on huomattava, mutta suuri osa tuon potentiaalin toteutumisesta vaatii kalliita infrastruktuuriuudistuksia.

## Lähteet

Apostolaki-Iosifidou, E., Codani, P. & Kempton, W. 2017, "Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging", *Energy*, vol. 127, pp. 730-742.

Babrowski, S., Heinrichs, H., Jochem, P. & Fichtner, W. 2014, "Load shift potential of electric vehicles in Europe", *Journal of Power Sources*, vol. 255, pp. 283-293.

Bellekom, S., Benders, R., Pelgröm, S. & Moll, H. 2012, "Electric cars and wind energy: Two problems, one solution? A study to combine wind energy and electric cars in 2020 in The Netherlands", *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 859-866.

Elenia OY, Verkkopalveluhinnasto, sulakepohjaiset sähkönsiirtotuotteet 1.5.2017 Viitattu 29.12.2017 <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Hourly/?dd=FI&view=table>

Fingrid. Säätosähkömarkkinat Viitattu 24.4.2017  
<http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/tasepalvelut/tasehallinta/saatosahkomarkkinat/Sivut/default.aspx>

Fingrid: Taajuusohjattu käyttö- ja häiröreservi:  
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi> Viitattu 14.5.2018

Fontainhas, J., Cunha, J. & Ferreira, P. 2016, "Is investing in an electric car worthwhile from a consumers' perspective?", *Energy*, vol. 115, pp. 1459-1477.

Hill, D.M., Agarwal, A.S. & Ayello, F. 2012, "Fleet operator risks for using fleets for V2G regulation", *Energy Policy*, vol. 41, no. 1, pp. 221-231.

Kempton, W. & Tomić, J. 2005, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue", *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 268-279.

Kempton, W. & Tomić, J. 2005, "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy", *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 280-294.

Nissan Motor Corporation, Nissan delivers 300,000th Nissan LEAF. Viitattu 7.3.2018 Saatavilla: <https://newsroom.nissan-global.com/releases/release-4a75570239bf1983b1e6a41b7d00d8f5-nissan-delivers-300000th-nissan-leaf>

Nordpool, Market-data Dayahead Prices Area-prices FI Hourly, Viitattu 29.12.2017  
<https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Hourly/?dd=FI&view=table>

Peterson, S.B., Apt, J. & Whitacre, J.F. 2010, "Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization", *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2385-2392.

Propfe, B. & Stephan, S. 2011, *Customer Suitability of Electric Vehicles based on Battery-state-of-charge Analysis*.

Rautiainen, A. 2015, *Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids*, Tampere University of Technology.

Seixas, J., Simões, S., Dias, L., Kanudia, A., Fortes, P. & Gargiulo, M. 2015, "Assessing the cost-effectiveness of electric vehicles in European countries using integrated modeling", *Energy Policy*, vol. 80, pp. 165-176.

Tomić, J. & Kempton, W. 2007, "Using fleets of electric-drive vehicles for grid support", *Journal of Power Sources*, vol. 168, no. 2, pp. 459-468.

U.S. Department of Energy, U. S. Environmental Protection Agency, Compare Side-by-Side: 2014 Nissan Leaf; 2015 Nissan Leaf; 2016 Nissan Leaf (30 kW-hr battery pack); 2016 Nissan Leaf (24 kW-hr battery pack). Viitattu 7.3.2018. Saatavilla: <https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=37066&id=37067&id=34918&id=34699>

Vattenfall: Kodin sähkönkulutus: <https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/sahkonkulutus/>  
 Viitattu 3.1.2019

Vuorilehto, K. 2013. Materialien und Funktion. In: Korthauer, R. (ed.). *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer. pp. 31-45.



## Liitteet

### LIITE 1: Sähkökauppa-algoritmi

```

%% Määritellään auton tekniset ominaisuudet.
E = 10;
P = 2.3;
n = 93.6;
Ceh = [0.6,1.2,1.8,2.4,3.0,3.6,4.2,4.8,5.4,6.0,6.6,7.2];
Cnlh = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1];
Cnph = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1];

%% Määritellään hyötysihte, latausaika pyöristettynä alaspäin tasatuntiin,
%% latausajan tasatunneista yli jäävä aika, sekä monenko tasatunnin edestä
%% voidaan myydä sähköä
n = n / 100;
t = E/(P*n);
t = floor(t)
modulo = mod(E,P*n);
modulo = modulo / (P*n);
myytavissa = floor((size(Ceh,2)-(t+1))/2)
%% Jos myytävissä oleva aika on negatiivinen, autoa ei voi ladata annetussa
%% ajassa täyteen, joten myyminenäkään ei ole mahdollista, ja ohjelma
%% suljetaan.
if myytavissa < 0;
    quit
else
end
%% Muodostetaan lopulliset hinnastot markkinahinnoista summaamalla siirto-
%% ja vähentämällä lataushinnoista.
osto = Ceh + Cnlh;
myynti = Ceh - Cnph;
myydaan = 0;
%% Selvitetään minä tunteina myynti on kannattavaa ottamalla selvää
%% kattaako i:nneksi suurimman tunnin myyntihinta t+i:nneksi pienimmän
%% tunnin ostohinnan. Mikäli kattaa, kyseisinä tunteina kannattaa ostaa ja
%% myydä. t pienintä tuntia jätetään pois koska näitä käsitellään auton
%% täyteen lataamisena.
for i = 1:myytavissa;
    tarkaastaa = myynti(end-(i-1))*n^2
    tarkastab = osto(t+i)
    if (myynti(end-(i-1))*n^2)-osto(t+i)>0
        myydaan = myydaan+1
    end
end
%% Ostohinnastosta otetaan tarvittava määrä pienimpiä tunteja myytäväksi
ostot = mink(osto,t + 1 + myydaan)
%% Saadusta hinnastosta kalleimmalla ladataan vain sen verran kuin
%% tasatunneista jää yli ladattavaa.
modulo = maxk(ostot,1) * modulo
ostot = mink(ostot,t + myydaan)
%% Brutto-ostohinta saadan summaamalla hinnat, ja kertomalla ne
%% latausteholla.
oh = sum(ostot);
oh = oh + modulo;

```

```
oh = oh * P;  
%% Jos myydään sähköä, myyntihinta saadaan myyntihintojen summasta  
%% kertomalla ne lataustehon ja hyötysuhteen neliön tulolla.  
if myydaan > 0;  
    myynnit = maxk(myynti,myydaan)  
    mh = sum(myyynnit);  
    mh = mh * (P * n^2);  
else mh = 0;  
end  
%% Lopullinen hinta saadaan myynti- ja ostohintojen erotuksena.  
%% Positiivinen luku tarkoittaa siis käyttäjän tekevän voittoa.  
total = mh - oh
```